

微生物は、古くから酒や納豆といった主に食品の分野において、広く親しまれてきた生き物である。微生物は、地球上で最も存在量が多い生き物である一方で、我々人類が確認している割合は3%にも満たないとも言われている。未だ発見されていない微生物の中には、予想を超える機能が隠れている。今回、その特異的な機能によって、まるでハンターのようにレアメタルを特異的に回収する微生物たちを紹介する。

レアメタルとは、①地球上の存在量が希である、②技術的、経済的な理由で抽出困難な金属で、現状の需要が高い、③今後の技術革新に伴い新たな需要が予想される、などの希少金属の総称である。経済産業省は31鉱種の金属をレアメタルとし、17鉱種あるレアアース（希土類）は1鉱種として数えている。レアメタルは、デジタル家電などの材料として不可欠な元素であり、少量添加することで、性能を飛躍的に伸ばしたり、特長を備えさせたりすることに使われ、産業のビタミンとも呼ばれている。一方で、レアメタルは偏在性が高く、抽出技術も不十分であるために、供給不安定になりやすいという問題を抱えている。このため、急激な価格の乱高下が起りやすく、インジウムの価格はここ10年間で6倍に高騰している。これは、多くのハイテク企業を抱える日本にとって、命取りになりかねない問題となっている。

近年、ゴミとして出された携帯電話や家電、パソコンに含まれる貴金属やレアメタルを鉱山に見立てた都市鉱山が注目されている。世界における埋蔵量の2008年度国別順位では、インジウムが2位、アンチモンが3位と、大量の資源が日本の資源として都市鉱山中に眠っている¹⁾。しかし、都市鉱山からのレアメタルの回収は、特定のレアメタルだけを回収する技術や採算の問題点から、ほとんど進んでいない。資源が乏しい日本では、未利用資源からのレアメタル回収が重要であると考えられ、生物機能を活用した（バイオミネラルリゼーションやバイオソープションなど）新たな技術開発が試みられている²⁾。

ここでは、生物によるレアメタルの特異的回収の例として、まずレアメタルの1鉱種であるセレン（Se）を、特異的に還元し、バイオミネラルリゼーションを行う微生物を紹介する。バイオミネラルリゼーションとは、生物が金属類を不溶化し金属類結晶・鉱床を形成する作用である。Seは工業的にも重要な金属資源で、硝子の着色および脱色剤や半導体原料などに利用されている。生物にとって必須微量元素であるが、水中での存在形態であるセレン酸塩（ SeO_4^{2-} : Se(VI)）や亜セレン酸塩（ SeO_3^{2-} : Se(IV)）は、生物に対して毒性を有することから、0.1 mg/l (ppm) 以下という厳しい排出基準が定められている。現在は物理化学的処理方法にて浄化が行われているが、廃棄物中のSe含量が低くSeを資源として回収することは難しい。

そこで水中に存在するSeを還元し、無毒・固形の元素

態セレン（Se(0)）に変換する好氣的セレン酸塩還元微生物 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株が分離・同定された。NT-I 株は、酸素が存在する条件下でセレン酸を還元しSe(0)を生成することができる珍しいセレン酸塩還元細菌である。高濃度のSe(VI)の還元が可能であるうえ、Se(IV)からSe(0)への還元もスムーズであり、水溶性Se除去の効率は世界で最も高いと言える³⁾。Se(0)は、約20 nm径の微粒子として微生物の細胞外に赤色アモルファスの状態で蓄積される。このNT-I株は、溶液中のセレン酸を固体の元素態Seにするというバイオミネラルリゼーションだけでなく、さらに固体の元素態Seから気体のメチル化Seにすることで、水中などの金属類を揮発化する作用であるバイオボラタリゼーションを行っている。気相中は夾雑物が少なく、ワンステップで高濃度・高純度のSeを回収できる可能性がある。

次に、溶解している金属類を細胞表面などに吸着するバイオソープションを利用したレアメタルの回収として、パラジウム（Pd）の還元を行う微生物を紹介する。Pdは高価なレアメタルであり、自動車の排気ガス浄化用触媒や、水素吸蔵合金として利用される。このPdを嫌氣的環境下において固体粒子にまで還元する機能をもっているのがFe(III)還元細菌 *Shewanella oneidensis* である²⁾。本来的には、Fe(III)イオンを還元して生育する微生物だが、Fe(III)とPd(II)の還元電位が同程度であることがPdを還元できる一因であると考えられている。また、*S. oneidensis*はPdだけでなく、白金族系の金属も還元することができる。Pdを回収するためには、微生物をあらかじめ生育させた後、細胞懸濁液をPd(II)イオンを含む溶液に添加する。Pd(II)イオンの還元は非常に迅速であり、最適条件下では、1 mMのPd(II)イオンから10分以内にPd粒子の生成が完了する。このとき、Pd粒子はペリプラズム空間に析出することから、細胞壁を破壊処理して、ナノ粒子を液相に分離・回収することは比較的容易である。

レアメタルのハイテク産業への需要加速が進む中で、回収技術の開発が切望されている。インジウム、アンチモンやレアアースなど、多様なレアメタルに対して、スナイパーのように特定のレアメタルを回収したり、散弾銃的に幅広くレアメタルを回収したり、といった微生物の機能を使い分けることで、多様なレアメタルに対応した回収方法を探っていくことができると考えられる。古くから食品分野に親しまれてきた微生物は、近未来のレアメタル問題をブレイクスルーする優秀なハンターとなると信じている。

1) <http://www.nims.go.jp/>

2) 池ら：メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収、CMC出版(2009)。

3) 野田口ら：日本生物工学会大会講演要旨集、p.52 (2007)。